

Современные геологические процессы

АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ (КАМЧАТКА) В 2016–2017 гг.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) осуществляет с 2000 г. детальный мониторинг активности вулканов Камчатки в режиме близком к реальному времени по трем методам наблюдений (Сенюков, 2013а; Чебров и др., 2012):

- мониторинг сейсмической активности районов активных вулканов по сети сейсмических станций;
- визуальные и видео наблюдения;
- спутниковый мониторинг термоаномалий и пепловых облаков на вулканах.

Непрерывная работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о возможном развитии вулканической активности. Результаты комплексного мониторинга вулканической активности с выставленным цветовым кодом опасности ежедневно публикуются на официальной странице КФ ФИЦ ЕГС РАН: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.

Оперативная информация о вулканической опасности передается в Главное управление МЧС Камчатского края, а также в рамках имеющихся договоров в ответственные службы России, Японии и США. Из всех перечисленных направлений сейсмический мониторинг является ведущим методом, потому что обеспечивает непрерывный контроль состояния вулканов в режиме реального времени.

ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ в XX–XXI вв.

Вулкан Безымянный (55.98° с.ш., 160.59° в.д.) высотой 2869 м над уровнем моря (н.у.м.), находится в самом центре Ключевской группы (рис. 1). Ближайшим соседом Безымянного с севера является потухший вулкан Камень (4670 м н.у.м.), а за ним расположен самый продуктивный вулкан Камчатки — Ключевской (4850 м н.у.м.).

Перед извержением 1955–1956 гг. Безымянный имел высоту 3100 м с вершинным кратером диаметром ~0.5 км и считался потухшим (Горшков, Богоявленская, 1965). В октябре 1955 г. после

~900-летнего покоя начались эксплозии вулканического типа, а 30 марта 1956 г. на вулкане произошло извержение типа «направленный взрыв», уничтожившее вершину и восточный склон. На месте вершины образовался кратер размером 1.5×2.8 км и глубиной 700 м. Вслед за взрывом над кратером поднялось эруптивное облако пепла на высоту 35–40 км. Область поражения в результате этого пароксизма, выделенная по наличию отложений и повреждений древесной растительности, имела форму овала площадью около 500 км².

В течение последующих 56-ти лет после пароксизма с периодичностью один два раза в год регистрировались эксплозивные извержения, связанные с ростом экстрезивного конуса во вновь образованном кратере (Girina, 2013).

До 2012 г. было зафиксировано двадцать эксплозивных извержений вулкана Безымянный. Извержения проявлялись в виде отдельные эксплозий продолжительностью от 20 минут до трех суток с высотой эруптивных облаков от 6 км до 15 км н.у.м. и образованием пирокластических потоков (Сенюков, 2013а). С 13 марта 2000 г. по 1 сентября 2012 г. средний промежуток времени между извержениями составил примерно 240 дней, с минимальным интервалом между извержениями 135 дней и максимальным — 485 дней. После 1 сентября 2012 г. и до декабря 2016 г. эксплозивные извержения не наблюдались. По нашему мнению, 4-летняя пауза в активности вулкана, связана с мощным Трещинным Толбачинским извержением имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии (ТТИ-50), происходившим с 27 ноября 2012 г. по сентябрь 2013 г. (Самойленко и др. 2012; Senyukov et al., 2013).

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

В рамках ФЦП «Научно-методическое обоснование создания первой очереди системы комплексного мониторинга вулканов Дальневосточного региона с разработкой и внедрением

технологий автоматизированной оценки активности», которая действовала в 2011–2013 г., в районе Ключевской группы вулканов были созданы специализированные пункты наблюдений (ПН) для комплексного мониторинга состояния вулканов (рис. 1). Кроме сейсмографов ПН оснащены микробарографами с целью регистрации акустических сигналов (АС), сопровождающих сильные эксплозивные извержения (Махмудов и др., 2016), наклономерными станциями для регистрации деформационных процессов связанных с активностью вулканов и видео регистраторами (Чебров и др., 2012).

На основе данных сейсмологических и спутниковых наблюдений в период 2000–2004 гг. были выделены предвестники эксплозивных извержений, определены пороговые значения параметров предшествующих извержениям: количество и энергия локальных вулканических землетрясений, разница между значениями температурной аномалией и фоном. Проведены статистические оценки заблаговременности и достоверности этих предвестников. В 2004–2012 гг. в режиме реального времени были сделаны 11 успешных краткосрочных прогнозов эксплозивных извержений вулкана Безымянный (Сенюков, 2013б).

Большинство извержений вулкана Безымянный предвараются статистически значимым

повышением параметра «уровень сейсмической активности по шкале СОУС'09» (Салтыков, 2011). По данным за 1999–2012 гг. для 21 извержения, с заблаговременностью до 40 суток в 9 случаях сейсмичность выходила на высокий уровень и в трех — на экстремально высокий (Кугаенко, Воропаев, 2015). В соответствии с современными требованиями к прогнозу опасных природных процессов, для вулкана Безымянный разработана методика вероятностного прогноза его извержений на основе шкалы СОУС'09 с использованием энергетических параметров мелкофокусной сейсмичности, локализованной в радиусе 6 км от вершины вулкана (Салтыков, 2016).

Быстрота оповещения о пепловой опасности, представляющую угрозу для авиатранспорта, во многом зависит от внедрения в практику наблюдений программ автоматического обнаружения сигналов, сопровождающие пепловые выбросы. В настоящее время для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным в КФ ФИЦ ЕГС РАН внедрена программа ADAP (Automatic Detection of Ash Plume) (Близнецов, Сенюков, 2015).

Все это позволило вовремя идентифицировать стадию активизации вулкана Безымянный в конце 2016 – начале 2017 гг. и заблаговременно спрогнозировать извержения, произошедшие в этот период.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭПИЗОДОВ АКТИВИЗАЦИИ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ В 2016–2017 гг.

Корректный сейсмический мониторинг Безымянного до 22 августа 2013 г., был невозможен из-за вулканического дрожания (ВД), сопровождавшее ТТИ-50. После его окончания следить за слабой сейсмичностью вулкана Безымянный не позволяло ВД в периоды активизации вулкана Ключевской (рис. 2б). В остальное время сейсмичность вулкана Безымянный была фоновой. Интенсивность ВД от вулкана Ключевской 27 октября 2016 г. снизилась до 1.0 мкм/с, на фоне которого единичные поверхностные землетрясения из района вулкана Безымянный начали регистрироваться с 28 октября 2016 г. (рис. 2б)

С 9 ноября 2016 г. по спутниковым данным начала отмечаться слабая термальная аномалия на экструзивном куполе вулкана. Разница температур земной поверхности в месте аномалии и окружающей среды (фона) 8 и 9 декабря составила ~20°C, а 12 декабря достигла 60°C (рис. 3). Как правило, если вулкан находился в спокойном состоянии разница температур не превышает 17°C (Сенюков, 2013а), но если она более 40°C, то вероятность возможного эксплозивного

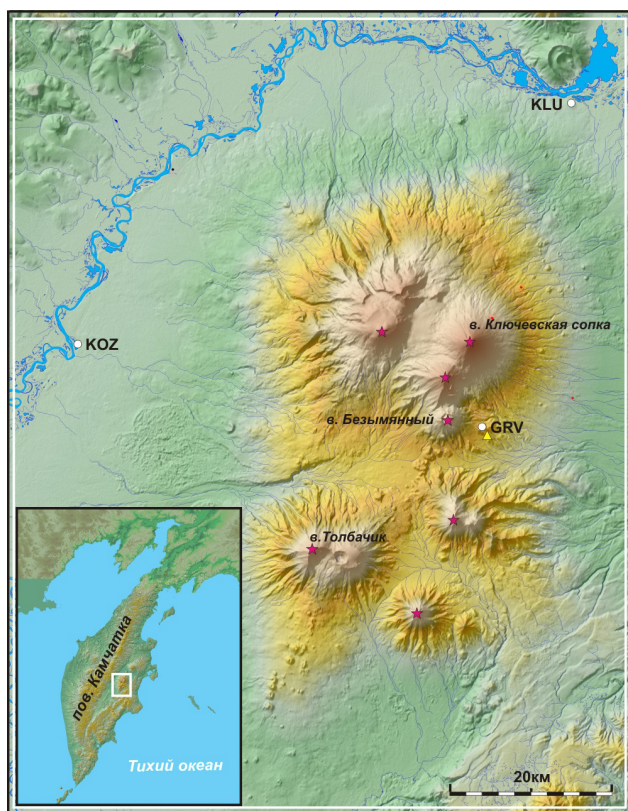


Рис. 1. Схема размещения пунктов наблюдения за вулканами на Ключевской группе вулканов. KLU — пос. Ключи, KOZ — пос. Козыревск, GRV — отрог вулкана Безымянного.

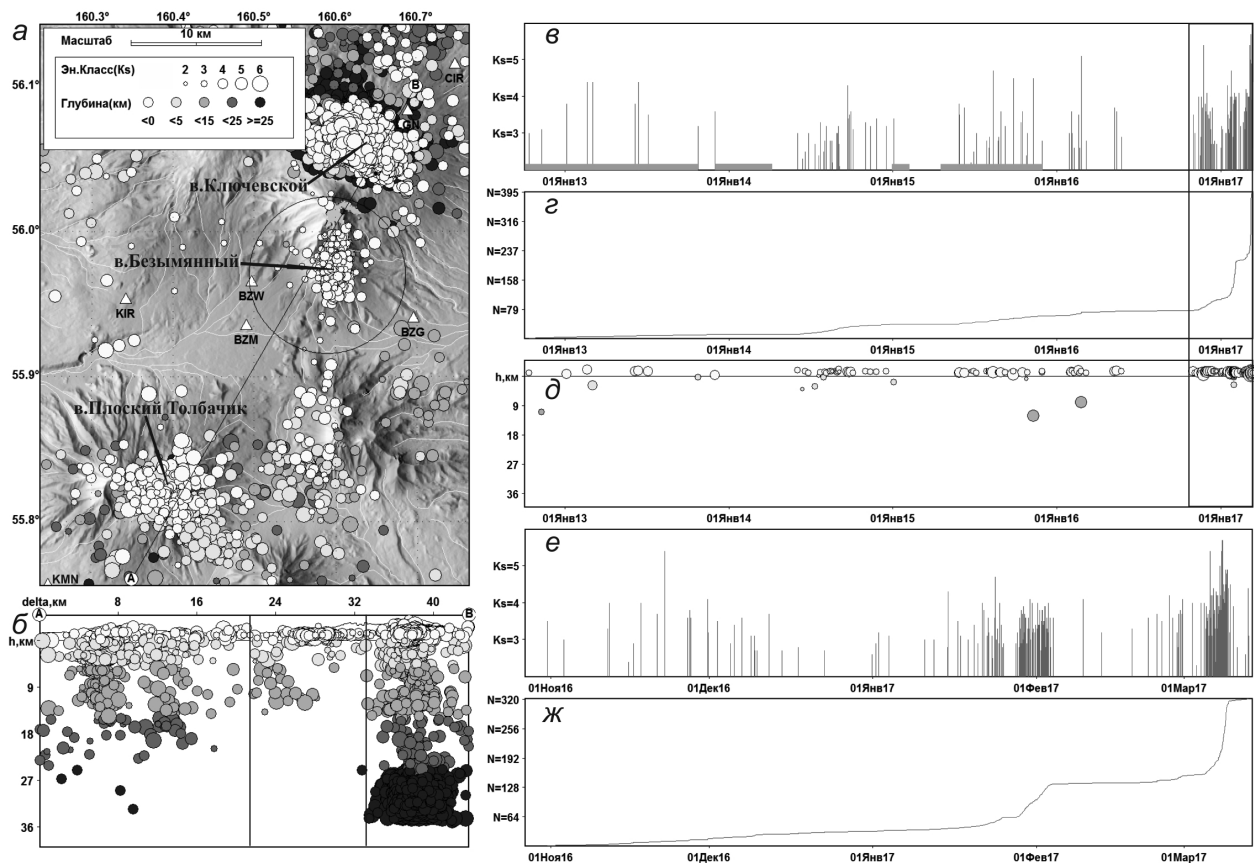


Рис. 2. Карта эпицентров (а), разрез с проекциями гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А-В (б) и графики активности для землетрясений вулкана Безымянный, зарегистрированных в цилиндре радиусом 7 км и глубине очагов ($-3 \div 40$) км с $K \geq 2$ за период 01.10.2012 – 14.03.2017 г.: энергетический класс (в), прямоугольниками отмечены периоды ВД, сопровождавшие извержения ТТИ-50 и вулкана Ключевской; кумулятивный график числа землетрясений (г); глубина гипоцентров (д). Графики активности за период 27.10.2016 г. – 14.03.2017 г.: энергетический класс по S-волне (е); кумулятивный график числа землетрясений (ж).

извержения в следующие 10 суток оценивается в 88%. На основании высокой температуры и повышенной сейсмичности был выдан прогноз извержения, переданный в Камчатский филиал Российского экспертного совета 12 декабря 2016 г. в 23:00. Согласно прогнозным формулировкам, с 12.12.2016 г. по 12.01.2017 г. с вероятностью 90% ожидалось эксплозивное извержение с высотой эруптивных облаков от 6 до 15 км н.у.м., продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток. Для населения опасность оценивалась в виде возможного выпадения пепла (мощностью несколько миллиметров) в близлежащих населенных пунктах (Ключи, Козыревск, Усть-Камчатск) в зависимости от направления ветра.

Также в первой половине ноября 2016 г. отмечался рост уровня сейсмической активности вулкана по шкале СОУС'09. Согласно прогнозу, который был передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС) 13 декабря 2016 г., ожидалось извержение вулкана Безымянный в период до 9 января 2016 г. Данный прогноз был произведен в отложенном режиме и был направлен на отработку выпуска

прогнозных сообщений по соответствующей методике.

Мощная парогазовая эмиссия с высотой эруптивного облака до 6 км н.у.м. была зафиксирована 15 декабря с 04:00 до 05:00 видео камерой с ПН КОЗ расположенного на расстоянии ~45 км от вулкана (рис. 1). Срочное сообщение об активизации вулкана было отправлено всем заинтересованным организациям 15 декабря 2016 г. в 05:30. Спутниковые данные зафиксировали пепловый шлейф в 07:04, протяженностью 60 км на запад от вулкана. Согласно (Гирина и др., 2017), наиболее вероятное время появления лавового потока на поверхности конуса — с 12 по 20 декабря.

Следующая активизация произошла с конца января до середины февраля 2017 г. При этом сначала наблюдалась повышенная сейсмичность (рис. 2в–ж), закончившаяся сходом раскаленных лавин, зарегистрированных по видео наблюдениям в темное время суток с 15 по 17 февраля. Сход лавин сопровождался повышенной разницей температуры (рис. 3). В конце февраля начала повышаться сейсмичность (рис. 3). Свежий раскаленный материал в виде лавового потока

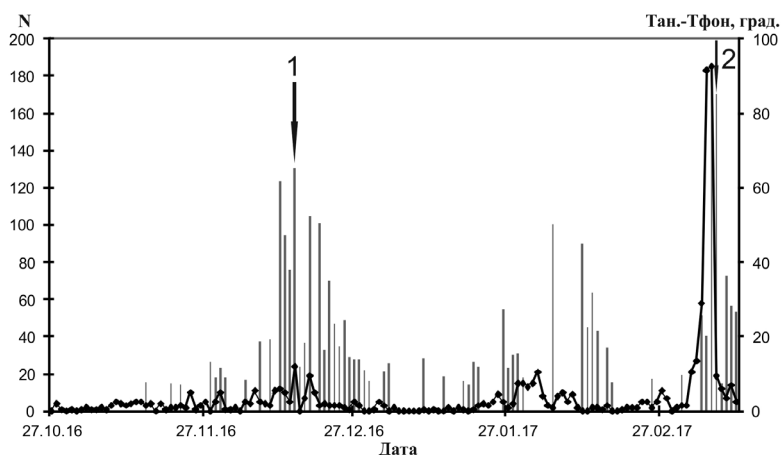


Рис. 3. Гистограмма разницы температуры термальной аномалии и фона (правая шкала) и график количества поверхностных событий (левая шкала) для вулкана Безымянный с 27.10.2016 г. по 14.03.2017 г. Стрелками обозначены эксплозивные извержения: 15.12.2016 г. и 09.03.2017 г.

появился на куполе вулкана в период с 5 по 12 февраля 2017 г. (Гирина и др., 2017), что было определено по термальным аномалиям и спутниковым данным. К сожалению, плохие погодные условия не позволили точнее установить время начала этого извержения.

На данный эпизод в КФ РЭС 26 января 2017 г. был дан прогноз по методике СОУС'09, в котором утверждалось, что вероятность извержения в ближайшие 10 дней превышает среднееголетнее значения в 5 раз. Прогноз был обновлен и продлен 3 февраля 2017 г., и вероятность извержения на ближайшие 10 дней выросла до значения 0.28, что превышает среднееголетнее значение в 7 раз.

С 18 по 25 февраля на вулкане наблюдалось сейсмическое затишье, а в конце февраля сейсмичность начала повышаться (рис. 3). С 5 марта 2017 г. в районе постройки вулкана Безымянный резко увеличилось количество землетрясений и их энергия (рис. 2, 3). На основании исследований сейсмической подготовки предыдущих извержений вулкана, подобный скачок сейсмической активности предшествует сильному эксплозивному извержению со временем упреждения до 7 дней с вероятностью 100% (Сенюков, 2013а). Поэтому 9 марта 2017 г. в 02:00 в КФ РЭС был подан прогноз извержения: с 9 марта по 9 апреля 2017 г. ожидается эксплозивное извержение вулкана Безымянный с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря.

Прогноз по методике СОУС'09 был передан в КФ РЭС 6 марта 2017 г. в следующей формулировке: вероятность извержения вулкана Безымянный составляет 0.26 на ближайшие 10 дней, что превышает среднееголетнее значение в 6 раз.

Видео камера, установленная на ПН BZG (рис. 1), начала фиксировать отдельные эксплозии 9 марта 2017 г. в 02:50 (рис. 4). Первый пепловый выброс был автоматически выделен программой ADAP в 03:03 с оценкой высоты эруптивного облака в 5.6 км н.у.м.

В 03 час 09 мин после достижения эруптивного облака высоты 6 км н.у.м. (оценка ADAP, H=7.7 км н.у.м.), было отправлено первое сообщение о начале извержения в соответствии с регламентом. Через 10 минут высота пепловой колонны достигла уже высоты 10 км н.у.м., и было сделано второе оповещение.

По данным спутника HIMAWARY-8 (Tokyo VAAC: http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html) эруптивный шлейф от вулкана Безымянный впервые был зафиксирован 9 марта в 03:42 и продолжал наблюдаться до 10 марта 12:00. Распространяясь в север-северо-западном направлении, он наблюдался на расстоянии >1500 км.

Следует отметить, что ход развития извержения и прогнозирование пепловой обстановки производилось специалистами группы KVERT (Kamchatka Volcanic Eruption Response Team) для эпизодов 15 декабря 2016 г. и 9 марта 2017 г.: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2016-195>; <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2017-20>

ОСОБЕННОСТИ ИЗВЕРЖЕНИЯ В МАРТЕ 2017 г. ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Перед извержением в декабре 2016 г. – марте 2017 г. по данным наклономерных наблюдений на пункте ПН BZG, не были зарегистрированы деформационные процессы, что согласуется с данными, полученными для извержений за период 2005–2010 гг., на сети пунктов GPS Ключевской группы вулканов (Grapenthin et al., 2013). Вероятно, это объясняется локализацией деформационных процессов только в зоне растущего купола вулкана Безымянный, которые не наблюдаются за пределами вулканической постройки за счет предполагаемого нами поверхностного расположения магматического очага (1–1.5 км) и небольшого расхода ювенильного материала при извержениях.

Наклономер в ПН BZG сориентирован по сторонам света. Его компоненты близки к

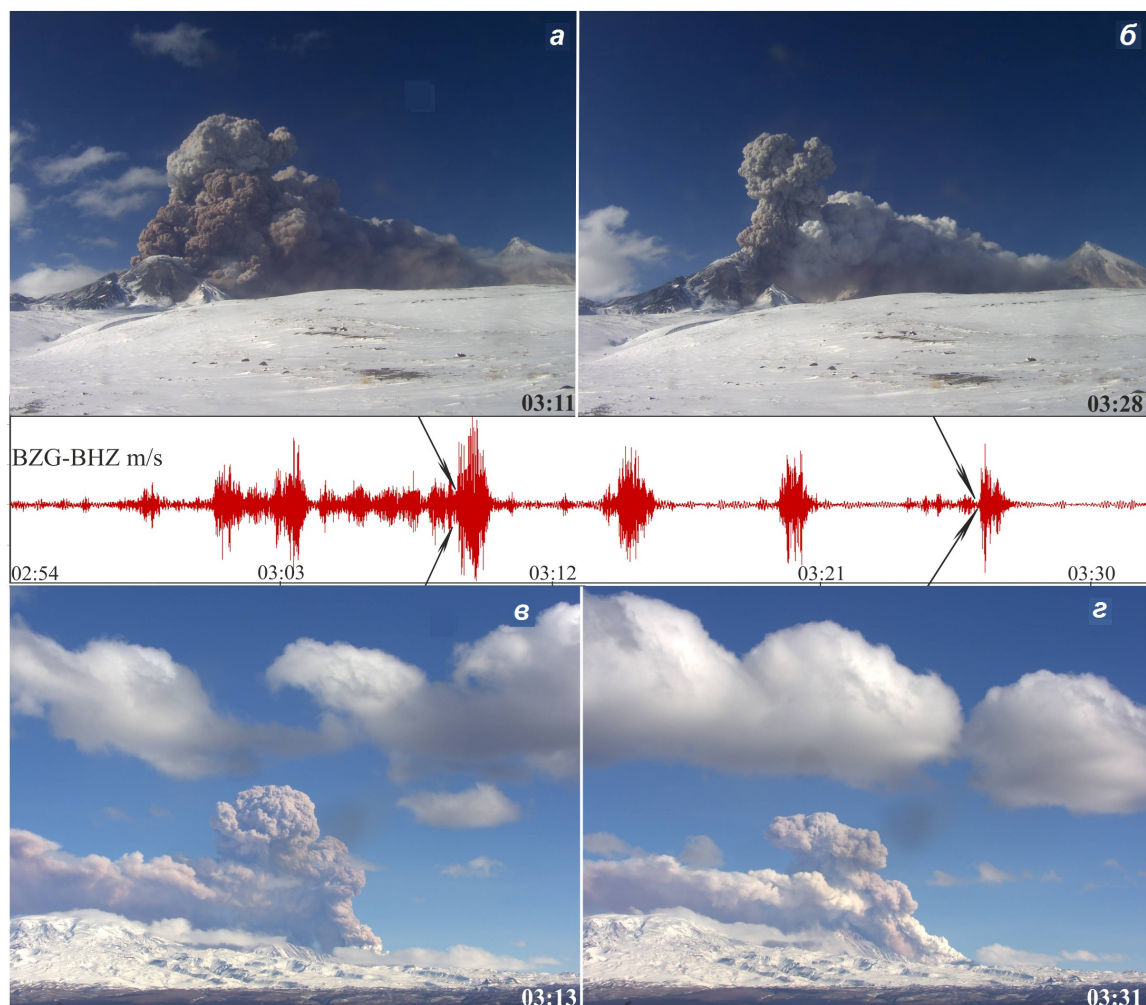


Рис. 4. Фрагменты извержения вулкана Безымянный, зафиксированные видеокамерами ПН BZG (а, б) и KOZ (в, г); запись вертикальной составляющей BHZ сейсмического сигнала на ПН BZG.

тангенциальной и радиальной составляющим наклонов относительно вершины вулкана. Сейсмические эффекты, сопровождавшие событие 9 марта отразились как на тангенциальной компоненте наклономера, так и на сейсмических записях (BZM SHZ) (рис. 5а, 5б). На радиальной составляющей наклономера записи сейсмических эффектов отсутствуют, что говорит о локальных особенностях ПН BZG для регистрации наклонов, происходящих в районе вулкана Безымянный.

Три наиболее четко выражены на сейсмических записях эксплозии сопровождались акустическими сигналами (3:09; 3:14; 3:19) инфразвукового диапазона, которые были записаны на ПН KOZ (рис. 5в). Две из них зарегистрировались международной инфразвуковой станцией IS44, расположенной в пос. Коряки на расстоянии ~370 км от вулкана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После 4-летнего периода покоя, по-видимому связанного с извержением ТТИ 50, постепенно

началась активизация вулкана Безымянный. В ходе данной активизации наблюдалось три эпизода, связанные с явным выносом ювенильного материала (Гирин и др., 2017):

- выжимание лавового потока (не ранее 12 декабря 2016 г.), со слабой эксплозивной активностью 15 декабря 2016 г.;
- выжимание порции менее вязкой лавы в период с 5 по 12 февраля 2017 г.;
- сильное эксплозивное извержение 9 марта 2017 г.

Все перечисленные эпизоды были заблаговременно спрогнозированы.

Первый эпизод спрогнозирован двумя методами: по уровню сейсмической активности (в режиме реального времени) и по методике СОУС'09 (в отложенном режиме). Из-за сложностей с точной датировкой момента начала поступления свежего материала на поверхность, заблаговременность прогноза оценивается в диапазоне от 0 до 3 дней.

Второй эпизод успешно спрогнозирован по методике СОУС'09 в реальном времени за 11–18 дней до начала извержения.

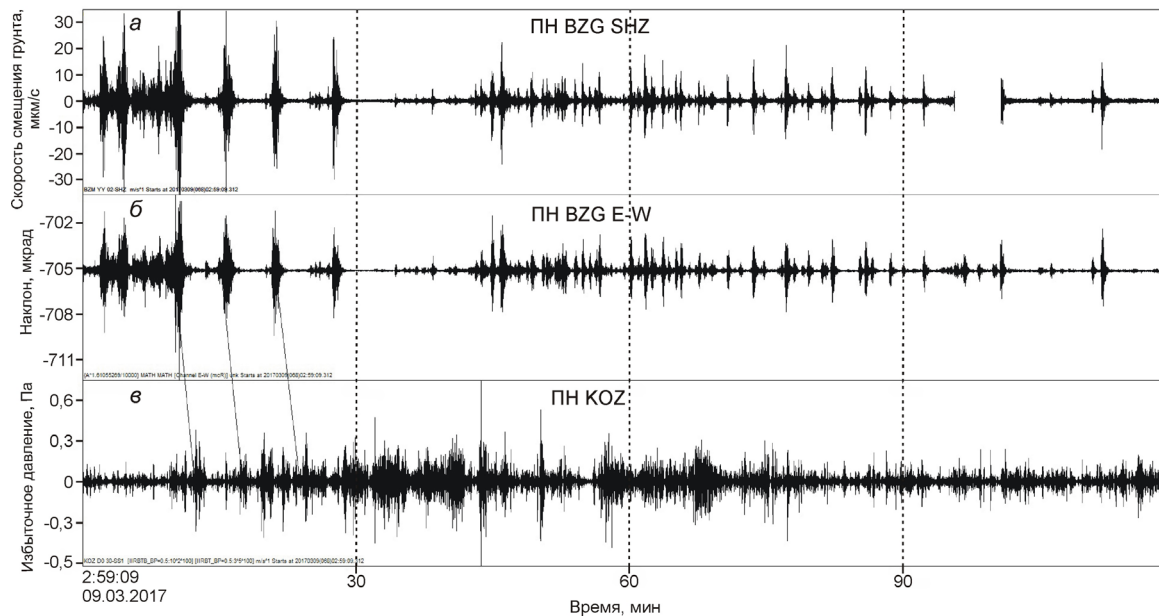


Рис. 5. Записи сейсмических сигналов на вертикальной составляющей SHZ (а) и вариаций наклонов на составляющей E-W в ПН BZG (б), запись инфразвуковых колебаний в ПН KOZ (в), сопровождавших активную фазу извержения вулкана Безымянный 9.03. 2017 г.

Третий эпизод успешно спрогнозирован двумя методами в режиме реального времени: по методике СОУС'09 за три дня до начала извержения, а по уровню сейсмической активности — за 1 час.

Вполне вероятно, что после 4-летней паузы вулкан Безымянный вернулся к прежнему режиму деятельности, как в 2000–2012 гг., и будет извергаться с периодичностью ~240 дней.

Существующая система сбора и обработки сейсмологической информации КФ ФИЦ ЕГС РАН показала свою эффективность в ходе активизации вулкана Безымянный в 2016–2017 гг.

Возобновление вулканической активности после значительного перерыва является достаточно уникальным событием, и в последнее десятилетие это характерно для вулканов Курило-Камчатского региона. Извержения вулканов Кизимен (2010–2013 гг.), Жупановский (2013–2015 гг.), Алаид (2015–2016 гг.) и, наконец, извержение вулкана Камбальный, начавшееся 25 марта 2017 г., свидетельствуют об активизации геодинамических процессов в северной части Курило-Камчатской зоны субдукции.

Работа выполнена в рамках темы НИР КФ ФИЦ ЕГС РАН №АААА-А16-116070550058-4.

Список литературы

- Близнецов В.Е., Сеньюков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчёта их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 46–59.
- Гирин О.А., Мельников Д.В., Демянчук Ю.В., Маневич А.Г. Извержение вулкана Безымян-

ный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. XX ежегодная научная конференция, посвященная дню вулканолога. Материалы конференции. Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 14–17.

- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 г. М.: Наука, 1965. 170 с.
- Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Вариации статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09: вулкан Безымянный // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 25. С. 31–40.
- Махмудов Е.Р., Фирстов П.П., Будилов Д.И. Информационная система для мониторинга волновых возмущений в атмосфере на полуострове Камчатка «KAMIN» // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 5–16.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45–59.
- Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Магуськин М.А., Овсянников А.А. Начало Трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. С. 20–22.
- Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим

- данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013а. № 1. С. 96–108.
- Сенюков С.Л.* Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing, 2013б. 144 с.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Дрознина С.Я. и др.* Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 40–54.
- Grapenthin R., Freymueller J.T., Serovetnikov S.S.* Surface deformation of Bezymianny Volcano, Kamchatka, recorded by GPS: The Eruptions from 2005–2010 and long-term, long-wavelength subsidence // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. № 1. P. 58–74.
- Girina O.A.* Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22–41.
- Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Y. et al.* Seismic monitoring of the Plosky Tolbachik eruption in 2012–2013 (Kamchatka peninsula Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 302. P. 117–129.

Сотрудники КФ ФИЦ ЕГС РАН

Д.В. Чебров, к. ф.-м. н.,
П.П. Фирстов, д. ф.-м. н.,
С.Л. Сенюков, к. г.-м. н.,
В.Е. Близнецов, прогр.,
П.В. Воропаев, н. с.,
В.Т. Гарбузова, н. с.,
С.Я. Дрознина, с. н. с.,
Т.Ю. Кожевникова, м. н. с.,
Ю.А. Кугаенко, к. ф.-м. н.,
З.А. Назарова, м. н. с.,
И.Н. Нуждина, н. с.,
В.А. Салтыков, к. ф.-м. н.,
Ю.К. Серафимова, с. н. с.,
С.С. Сероветников, н. с.,
О.В. Соболевская, м. н. с.